

# 自己相似フォトリック結晶における光伝搬特性の研究

著者	和田 拓也
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	90
号	1
ページ	150-151
発行年	2021-08-20
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00132854">http://hdl.handle.net/10097/00132854</a>

修士学位論文要約（令和3年3月）

# 自己相似フォトニック結晶における光伝搬特性の研究

和田 拓也

指導教員:山田 博仁, 研究指導教員:松田 信幸

## Study on Light Propagation Characteristics in Self-similar Photonic Crystals

Takuya WADA

Supervisor: Hirohito YAMADA, Research Advisor: Nobuyuki MATSUDA

I investigated a new structure to realize a slow light waveguide, which is an optical waveguide with reduced light propagation velocity. I applied a photonic structure called a self-similar structure, which was proposed very recently, to an one-dimensional photonic crystal and tried to control the group velocity by the branching phenomenon of the photonic band induced by the structure. As a result of numerical simulation by the plane wave expansion method, a slow light mode with a flat dispersion and a group refractive index of over 100 was successfully obtained.

### 1. はじめに

最近, 多数の光導波路が1次元方向に近接配列した光導波路アレイを対象として, 光を強く局在させる構造である「自己相似構造」が提案され<sup>1)</sup>, さらに実験的に実証された<sup>2)</sup>. 自己相似構造は, 光導波路アレイの各導波路の屈折率を自己相似と呼ばれるルールに従って変調することで, 伝搬光の隣接導波路への結合を大幅に抑制することのできる構造である. このことに着想を得て, 本研究では「自己相似構造」を光波の進行方向について適用し光伝搬を制御することで, 光の群速度を遅くすることができないか理論検討を行った.

### 2. 提案する自己相似フォトニック結晶

本研究では, 1次元フォトニック結晶として, 屈折率が $x, y$ 軸方向に一樣で, 光の伝搬方向 $z$ についてのみ変調された仮想媒質を想定する. 変調のルールは, 自己相似光導波路アレイを参考にし, 媒質の一樣な屈折率 $n_0$ に次の各項を重ね合わせたものとする.

$n = 1$ : 振幅 $B$ , 周期 $A$ の正弦波状の屈折率分布  
 $n = 2$ : 振幅 $\alpha^1 B$ , 周期 $2^1 A$ の正弦波状の屈折率分布  
 $n = 3$ : 振幅 $\alpha^2 B$ , 周期 $2^2 A$ の正弦波状の屈折率分布  
 $\vdots$

$n = N$ : 振幅 $\alpha^{(N-1)} B$ , 周期 $2^{(N-1)} A$ の正弦波状の屈折率分布

ここで $B$ は基本周期構造の振幅,  $A$ は基本周期構造の周期,  $\alpha$ は振幅変調係数である.  $N$ は重ね合わせの総項数である. 自己相似化された屈折率分布とそれを構成する各項のパターンについて図1に示した.

### 3. 自己相似フォトニック結晶の数値解析

$n_0 = 2$ ,  $B = 0.25$ ,  $\alpha = 1$ ,  $A = 1 \mu\text{m}$ として得られる図2の各屈折率分布について, 1次元平面波展開法を用いてフォトニックバンド図を計算した. 図3の各図は図2の各図にそれぞれ対応する. データ点は平面波展開法において固有値方程式を満たす波数と周波数の値の組を示す. データ点を連結したものがフォトニックバンドである. 塗りつぶされた領域はモードが存在しないフォトニックバンドギャップを示す.

図3(a)では規格化周波数0.25の付近にバンドギャップが発生している. この周波数は, 図2(a)の分布の周期で決まるブラッグ回折条件を満たしており, 図2(a)の構造の1次のフォトニックバンドギャップである. 図2(b)においては, 屈折率の周期が図2(a)のものに比べ2倍となっている. これに対応するかたちで図3(b)の1次のフォトニックバンドギャップの周波数は, 図3(a)の値の1/2となっている.

項 $n = 1$ と $n = 2$ の重ね合わせ構造のバンド図である図3(c)では, 各項固有のフォトニックバンドギャップに加え, 規格化周波数0.38の付近に新たにギャップが発生していることが確認できる. その結果, 基本構

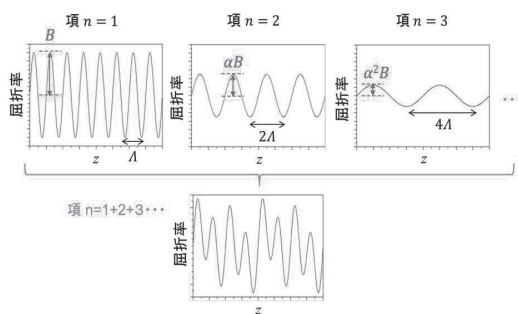
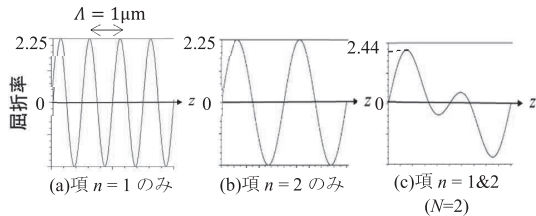
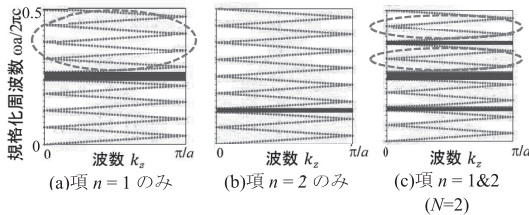
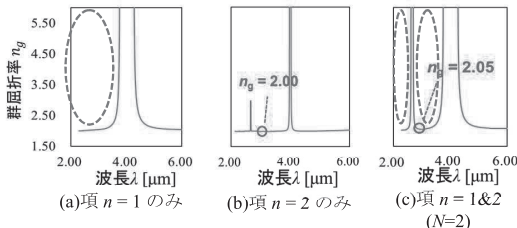


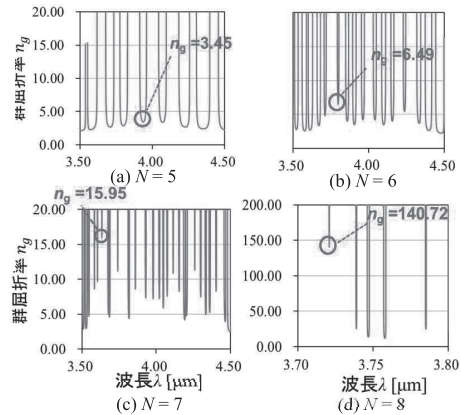
図1 自己相似フォトニック結晶(下段)とそれを構成する屈折率分布(上段)

図2 1次元フォトニック結晶の屈折率分布( $\alpha = 1, B = 0.25$ )図3 フォトニックバンド図( $\alpha = 1, B = 0.25$ )図4 群屈折率スペクトル( $\alpha = 1, B = 0.25$ )

造である項  $n = 1$  のバンド(図3(a)の破線で囲まれた領域)が2つに分離した. 先行研究の自己相似導波路アレイにおいて, 自己相似化により横( $k_x$ )方向のフォトニックバンドの分岐が得られる. 図3(c)より, 本研究における縦( $k_z$ )方向の自己相似構造においても, 自己相似構造に特徴的なバンドの分岐を確認することができた(図3(c)の破線で囲まれた領域). 図示しないが, さらに重ね合わせ項数  $N$  を増やした場合, バンド図にさらなるバンドの分岐を確認した. これは自己相似導波路アレイにおけるバンド分岐現象と一致する. なお, 重ね合わせにより新たに発生したギャップの位置は, 高次のブラッグ回折によっても説明することができる.

続いて, 図3のバンド図の傾きから群屈折率  $n_g$  を求め, そのスペクトルを図4に示した. 図4の各図も図2の各図にそれぞれ対応する. 図4(a), (b)においては, バンドギャップの近傍で分散の傾きが小さくなることから,  $n_g$  が上昇した. ただし, 群屈折率の傾き, すなわち群速度分散が限りなく大きいため, これらのモードは光パルス伝搬に用いることができない. それ以外の領域の  $n_g$  は2である.

一方, 2項の重ね合わせ構造についての結果である図4(c)では, 重ね合わせにより新たに生じたギャップ位置に対応する波長(約  $2.7 \mu\text{m}$ )において新たに群屈折率の上昇(吊り上がり)が得られた. この吊り上

図5 より大きな重ね合わせ構造の群屈折率スペクトル( $\alpha = 1, B = 0.1, n_0 = 2, \Lambda = 1 \mu\text{m}$ )

がりにより, 分岐したバンドに対応する破線で囲まれた波長域において,  $n_g$  がわずかに上昇し, また分散フラットな領域が新たに出現した. さらに重ね合わせ項数  $N$  を大きくしたとき, 同様の現象が見られ, 分散フラットな波長域の  $n_g$  は上昇した.

次いで, 重ね合わせ項数を増加し, 大規模な自己相似フォトニック結晶についてのシミュレーションを行った.  $B = 0.1, \alpha = 1$  の条件で, 重ね合わせ項数  $N$  を5, 6, 7, 8としたときの群屈折率スペクトルを図5(a)~(d)にそれぞれ示す.  $N$  の増加とともにバンドギャップの個数が増え, その結果分散フラットな波長域の群屈折率  $n_g$  が大きく上昇した. 特に,  $N = 8$  において100を超える群屈折率を得ることができた.

次に, 振幅変調係数  $\alpha$  の値を0.5, 0.75, 1, 1.25に変更して同様の計算を行い, 比較検討を行った. 各条件で分散フラットな領域の最大群屈折率  $n_g$  を計算した結果, どの振幅変調係数  $\alpha$  においても,  $N$  を増やすことで群屈折率  $n_g$  が指数関数的に増加した. さらに, 計算した4つの条件の中で,  $\alpha = 0.75$  のときの群屈折率  $n_g$  が最も大きな増加傾向を示した. このことから, 高い群屈折率  $n_g$  を得るための振幅変調係数  $\alpha$  の最適値は, 自己相似光導波路アレイにおける最適値( $\alpha = 0.5$ )とは異なることが分かった.

#### 4. まとめ

最も単純な屈折率変調構造による1次元フォトニック結晶について自己相似性を適用した. 平面波展開法によるフォトニックバンド計算の結果, 振幅変調係数を適切に設定し, 重ね合わせ項数を増やすことで, 分散フラットかつ群屈折率の大きな波長領域( $n_g > 100$ )の形成ができることを見出した.

#### 文献

- 1) J. Guglielmon, *et al.*, Phys. Rev. A **99**, 063807 (2019).
- 2) 菊地ら, 第616回伝送工学研究会, 616-1 (2020).